考虑电池包数量的自动化集装箱码头多 AGV 调度优化问题研究 *

许彭锦，梁承姬

(上海海事大学 物流研究中心，上海 201306)

摘　要：针对自动化集装箱码头自动引导小车(automated guided vehicle，AGV)的实际换电特性，为了降低 AGV 的总任务完成时间和换电总时间，合理规划换电站内的电池包数量，建立了双层规划模型。首先考虑 AGV 的电池续航、空重载 SOC 变化特性和不同剩余电量与速度变化，以降低 AGV 的总任务完成时间为目标，构建考虑换电的多 AGV 集装箱任务调度上层模型。在此基础上，为了合理规划换电站内的电池包数量，考虑自动化码头中换电站的实际电池包选取原则和换电流程，对换电站和电池包的选择进行决策，以降低换电总时间为目标，构建换电电池包配置下层模型。最后通过遗传算法分别对小规模和大规模算例进行求解。算例结果表明，此双层规划模型能够有效地减少总任务完成时间和换电总时间，提高了 6.46%的 AGV 利用率，减少了 23.1%的换电站电池包数量。

关键词：自动化集装箱码头；自动牵引车；遗传算法；电池包数量
中图分类号：U691.3　　doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2022.03.0085

Research on multi AGV scheduling optimization of automated container terminal considering number of battery packs

Xu Pengjin, Liang Chengji

(*Logistics Research Center*, *Shanghai Maritime University*, *Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: According to the actual power exchange characteristics of AGV in automated container terminal, build a two-level programming model to reduce the total task completion time and power exchange time of the AGV, and reasonably plan the number of battery packs in the power exchange station. Firstly, considering the battery life, air and heavy load SOC variation characteristics and different residual power and speed changes of AGV, in order to reduce the total task completion time of AGV, build an upper-level model for multi-AGV container task scheduling considering power exchange. On this basis, in order to reasonably plan the number of battery packs in the power exchange station, consider the actual battery pack selection principle and power exchange process of the power exchange station in the automatic wharf, make decisions on the selection of power exchange station and battery pack, and build the lower level model of power exchange battery pack configuration with the goal of reducing the total power exchange time. Finally, small-scale and large-scale examples are solved by genetic algorithm. The example results show that the two-level programming model can effectively reduce the total task completion time and the total power exchange time, improve the utilization rate of AGV by 6.46% and reduce the number of battery packs in the power exchange station by 23.1%.

Key words: automated container terminal; automated guided vehicle; genetic algorithm; number of battery packs

0　引言

在连接海-陆物流运输的整个过程中，集装箱码头起了至关重要的作用。随着全球经济一体化的全面发展，“地球村”概念深入落实，传统集装箱码头的运输效率高、安全性好等优势已经无法满足全球经济发展的需要了。而自动化集装箱码头相比于传统的集装箱码头，自动化集装箱码头的最大特点就是实现了集装箱的装卸作业、堆场的装卸作业和水平运输的自动化智能化操作。在整个码头和堆场的作业区域中，不再有人的参与，而是通过由电力驱动的 AGV(Automated Guided Vehicle)小车，来对集装箱进行装卸搬运作业，因此，纯电力驱动的 AGV 的作业效率，很大程度上决定着整个集装箱码头的运作效率。AGV 的电量状态可用 SOC(State of Charge)来描述，即电池使用一段时间或长期搁置不用后的剩余可放电电量与其完全充电状态的电量的比值，常用百分数表示。因此，Kim[1]等人对于 AGV 的调度问题，采用了一种时间事件发生的方法，以最小 AGV 工作时间和最小船舶延误时间为目标，来对 AGV 进行任务分配。Frank Schneider[2]等人建立一个电池交换站网络，提出了一个动态规划模型来辅助最优收费决策，模型的结果能够有效地根据动态的电价来决策是否给电池充电。XiXiang[3]等人提出了一种考虑电池管理的自动化集装箱码头性能评估的嵌套半开放排队网络模型，在模型近似解的基础上，进一步优化了系统的资源分配和布局设计。石楠路[4]等人为了降低 AGV 的换电过程对其调度的影响，为了提高 AGV 的工作效率，构建了考虑 AGV 换电过程的混合整数调度模型。周小凡[5]等人考虑了 AGV 电池的续航能力和重空载的耗电差异等约束，建立以最小化 AGV 任务完成时间为目标的 AGV 调度模型。张亚绮[6]等人根据电力驱动的 AGV 的充电需求和运输特性，考虑垂直堆场布局和 AGV 充电过程对实际作业的影响，以最大化 AGV 充电利用率、最小化最末任务完成时间以及最小化 AGV 空载时间为目标，建立 AGV 的作业调度模型。吴洪明[7]等人为了提高自动化集装箱码头 AGV 的作业效率，考虑 AGV 的空载重载耗电特性以及充电的非线性的特征，建立以总任务完成时间最短为目标的 AGV 调度模型。丁一[8]等人为解决多载 AGV 的动态调度问题，考虑 AGV 的装载能力和充电后的续航能

收稿日期：2022-03-08；**修回日期：**2022-04-24　**基金项目：**国家自然科学基金面上项目(71972128)；国家重点研发计划(2019YFB170164)

作者简介：许彭锦(1998-)，男，江西九江人，硕士研究生，主要研究方向为自动化集装箱码头 AGV 的充电优化；梁承姬(1970-)，女，教授，博士，主要研究方向为物流系统运作计划与优化口岸物流流程模拟与重组、港口布局优化与模拟、港口安全工程等.

力，采用周期与事件混合驱动的滚动时域的优化策略，构建 AGV 动态作业调度的混合整数规划模型。郑亚红[9]等人为了减少 AGV 在换电站中的排队等待时间，构建 AGV 作业与换电的协同调度优化模型，并设计遗传算法求解模型。傅正堂[10]等人对 AGV 电量在非饱和状态下的放电特性进行研究，对该问题建立数学模型并用 CPLEX 求解器求解。范厚明[11]等人采用两阶段建模方法，分别建立数学模型，设计枚举法和遗传算法来对双小车岸桥和 AGV 进行联合配置；宋绍京[12]等人为解决合理规划 AGV 数量，以 AGV 工作效率最大化为目标，结合车间大小和 AGV 自身特性等因素建立数学模型，通过实际应用场景，验证了模型的有效性。黄宇超[13]从换电站的布局设计、换电站内的设备设施布局以及 AGV 的调度系统等方面进行分析，设计新的布局方案，通过对比分析，验证了方案的有效性。樊陆彬[14]等人从不确定性的角度出发，分别建立集卡分派子模型和集卡配置子模型，并将完工时刻和集卡数量作为公用设计变量连接两个子模型，通过算例求解该耦合模型，使得延误成本和集卡数量得到有效的减少，验证了模型的有效性。陈香玲[15]等人为了提高 AGV 在物流中心的工作效率，考虑 AGV 在搬运工作过程中的电量消耗和其充电特性，提出以 AGV 剩余电量和包裹时间窗等约束条件，以最小化分拣作业周期为目标的混合整数规划(MIP)模型和约束规划(CP)模型，通过实例分析，验证了模型性能的有效性。

综上可知，在对自动化集装箱码头 AGV 调度的研究中，大多数是针对 AGV 的换电模式和策略，对影响 AGV 换电的因素考虑的还不够全面。因此，本文在已有研究基础上，首先考虑 AGV 的电池续航及空重载 SOC 变化特性和不同剩余电量下的空重载速度变化，提高电池包利用率，以降低 AGV 的总任务完成时间为目标，构建考虑换电因素的 AGV 集装箱任务调度的上层模型。为了对集装箱任务调度过程中产生的换电任务进行调度，且合理规划换电站内的电池包数量，本文考虑自动化码头中换电站的实际电池包选取原则和换电流程，对换电站和电池包的选择进行决策，以降低换电总时间为目标，构建换电电池包配置下层模型，与上层模型构成解决集装箱任务调度和换电任务调度的双层模型。

1　问题描述

图 1 为垂直式自动化集装箱码头的实际布局示意图，整个自动化码头可分为三个区域：自动化堆场、AGV 工作区域和岸桥工作区域，而换电站以及换电站配套设施需要较大的占地面积，一般会布局在 AGV 行车主干道的尽头两侧。在自动化集装箱码头中，通过利用纯电驱动的 AGV 来对集装箱进行装卸搬运作业，即将不同的集装箱搬运至相应的堆场缓存区和岸桥缓存区，具体布局如图 1。

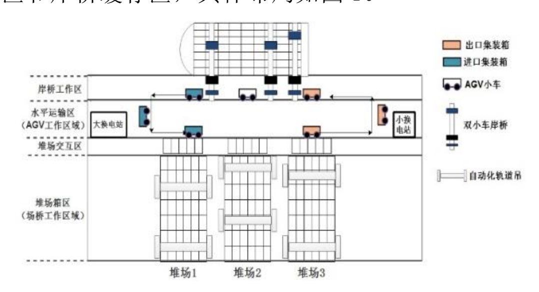


图 1　自动化码头垂直式布局图

Fig. 1　Vertical layout of automatic Wharf

如图 1，在混合装卸作业模式下，AGV 小车此次的出口集装箱任务的起点在堆场 3，AGV 行驶至堆场 3 处的交互区，从缓冲支架上取得出口集装箱后，根据既定路线，通过行车主干道，将此集装箱运送至对应的岸桥门架小车处进行集装箱交接，若下一个进口集装箱的起点不在此岸桥的中转平台上，则空车行驶至进口集装箱所在中转平台的岸桥处，取得此进口集装箱后，将其运送至对应的终点堆场 1 处。

在完成一个集装箱任务后，需要判断 AGV 的剩余电量是否低于阈值，或者是否能够完成下一个集装箱任务，如果不能，则需要去换电站进行换电任务作业，如果满足，则继续执行集装箱任务作业。并且此时还需要根据 AGV 自身的剩余电量来选择不同的运行速度，当剩余电量较低的时候，为了提高电池的利用率，AGV 的运行速度将会有所降低。

在实际换电站中，换电站的硬件设备主要是由换电机器人、充电机组和电池仓组成，电池包的更换流程为：当需要换电的 AGV 驶向目标换电站，从换电站的一端入口驶入到达指定的换电工位后，由换电机器人从电池仓中选取符合换电要求的电池包，对 AGV 进行电池包更换，在目前洋山港四期自动化码头中，换电站进行一次更换电池包的平均操作时间为 300s。与此同时，充电机组将会对从 AGV 上更换下来的乏电电池包进行充电。当 AGV 更换好电池包后，从换电站的另一端驶出换电站，驶向下一任务的发箱位置，继续搬运执行任务。

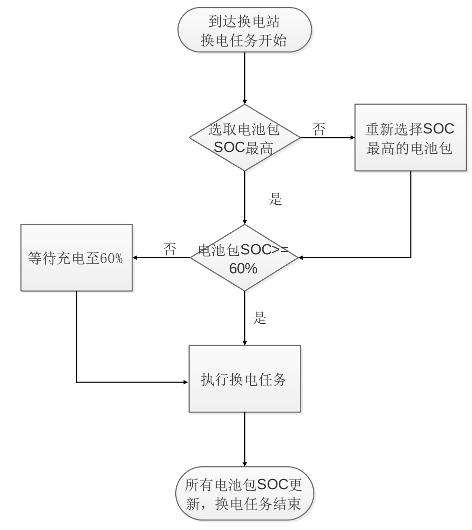


图 2　AGV 换电流程图

Fig. 2　AGV power exchange flow chart

在图 2 中：当 AGV 产生换电需求时，首先会根据这一次去不同换电站换电的总时间，判断是去大换电站还是小换电站，紧接着执行换电任务。当 AGV 到达某换电站的换电工位时，换电机器人需要对电池包的选取作出决策，满电状态和电池仓内 SOC 最高的电池作为优先选择，由于换电站内是采取边换边充的模式，即换电机器人选取电池包进行换电的同时，充电机组会对换电站内的电量不足的电池包进行充电，这会存在一个最低允许换电电量 Pv，即当电池仓内的所有电池 SOC 均小于 Pv，则 AGV 需要等待有电池包充电至 Pv，然后更换此电池包再驶出换电站。并且在换电机器人选择 SOC 最高的电池包进行换电作业时候，如果可选择的电池包有多个，则选取使用次数较多的那一个电池包进行换电作业。

2　模型建立

2.1　上层 AGV 集装箱任务调度模型

2.1.1 模型假设

a)AGV 初始电量为 100%；

b)在作业过程中，不考虑设备故障以及碰撞等突发因素；

c)岸桥、场桥的每个装卸任务的操作顺序和操作时间已知；

d)所有集装箱大小均为 40 英尺，一辆 AGV 一次装载一个集装箱。

2.1.2 符号说明

本文上层模型使用的符号如表 1 所示。

表 1　上层模型的符号说明

Tab. 1　Symbol description of upper layer model

符号	含义
V_0	V_0={v_0}虚拟开始任务集合
$V_0^{'}$	$V_0^{'}$={$v_0^{'}$}虚拟结束任务集合
V_t	V_t={1,2,3,4,.....t}装卸任务集
K	K={1,2,3,4,.....k}，AGV 集合
V_k	第 k 台 AGV 对应的换电任务集合
V_b	$V_b=V_1\cup V_2\cup V_3\cup....\cup V_k$，全部换电任务集合
V	$V=V_0\cup V_0^{'}\cup V_b\cup V_t$，任务集合
$s1_{ki}$ $s2_{ki}$	第 k 台 AGV 执行第 i 个装卸任务时的空重载速度
r_1 r_2 r_3	AGV 空重载和停车每秒耗电百分比
MC	执行换电任务的最低电量
ty tq	岸桥场桥的平均操作时间
a_{fix}	一次更换电池包的操作时间
WW_{ki}	第 k 台 AGV 执行换电任务 i 的排队时间
fd_i	i 任务发箱位置与收箱位置的距离
qe_i	i 任务的最早允许开始时刻
D_{ij}	i 任务终点与 j 任务起点的距离
ed_{ki}	执行 i 任务的空驶距离，从紧前任务终点到 i 任务起点的距离
z_{ki}	第 k 台 AGV 执行 i 任务的完成时刻
w_{ki}	第 k 台 AGV 执行 i 任务的岸边等待时长
b_{ki}	第 k 台 AGV 开始 i 任务的电池包剩余电量百分比
bb_{ki}	第 k 台 AGV 完成 i 任务的电池包剩余电量百分比
x_{kij}	决策变量，若第 k 台 AGV 在执行任务 i 之后执行任务 j，则 $x_{kij}=1$，否则为 0

2.1.3 模型建立

式(1)为目标函数，表示最小化最大完工时间；

$$Min\quad F \tag{1}$$

s.t.

$$F\geq Z_{ki},\forall k\in K;i\in V \tag{2}$$

$$\sum_{i\in V_0}x_{kij}=1\quad \forall j\in V;k\in K \tag{3}$$

$$\sum_{j\in V_0^{'}}x_{kij}=1,\forall j\in V;k\in K \tag{4}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in V_t}x_{kij}=1,\forall j\in V \tag{5}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in V_t}x_{kij}=1,\forall i\in V \tag{6}$$

$$\sum_{i\in V}x_{kih}=\sum_{j\in V}x_{khj},\forall h\in V_b\cup V_t;k\in K \tag{7}$$

$$ed_{ki}=\sum_{j\in V}x_{kji}D_{ji},\forall k\in K,i\in V \tag{8}$$

$$w_{ki}=\begin{cases}qe_j\text{-}x_{kij}\cdot(z_{ki}+ed_{ki}/s_1),\forall k\in K;j\in V_t;i\in V\\ WW_{ki},\forall k\in K,i\in V_k\end{cases} \tag{9}$$

$$z_{kj}=\begin{cases}z_{ki}+x_{kij}\cdot(w_{kj}+ed_{kj}/s_1+fd_{kj}/s_2+ty+tq),\forall k\in K;j\in V_t;i\in V\\ z_{ki}+x_{kij}\cdot(w_{ki}+a_{fix}+ed_{ki}/s_2),\forall k\in K;j\in V_k;i\in V_t\end{cases} \tag{10}$$

$$b_{kj}=bb_{ki}+M(1\text{-}x_{kij}),\forall k\in K;i\in V;\forall j\in V_t \tag{11}$$

$$b_{kj}\leq MC,\forall k\in K;j\in V_b \tag{12}$$

$$bb_{ki}=\begin{cases}100\%,\forall k\in K;i\in V_0\cup V_b\\ b_{ki}\text{-}r_1ed_{ki}/s_1\text{-}r_2fd_i/s_2\text{-}r_3w_{ki},\forall k\in K;i\in V_t\end{cases} \tag{13}$$

$$\sum_{\forall i\notin V_k}x_{kij}=0,\forall k\in K;j\in V \tag{14}$$

$$\sum_{i\in V}x_{kij}\leq s,\forall k\in K;j\in V_k \tag{15}$$

$$\sum_{\forall h\in V_i}x_{khi}-\sum_{\forall h'\in V_i}x_{kh'j}\leq 0,\forall k\in K;i,j\in V_k,j\leq i \tag{16}$$

$$s1_{ki}=\begin{cases}s1,0<b_{ki}\leq ps1\\ s1^{'},ps1<b_{ki}\leq ps2\\ s1^{''},ps2<b_{ki}\leq 100\%\end{cases},\forall k\in K;i\in V_t \tag{17}$$

$$s2_{ki}=\begin{cases}s2,0<b_{ki}\leq ps1\\ s2^{'},ps1<b_{ki}\leq ps2\\ s2^{''},ps2<b_{ki}\leq 100\%\end{cases},\forall k\in K;i\in V_t \tag{18}$$

$$x_{kij}\in\{0,1\},\quad\forall k\in K;i,j\in V \tag{19}$$

$$Z_{ki}>0,f>0,bb_{ki}>0,b_{ki}>0,w_{ki}\geq 0,ed_{ki}\geq 0,\forall k\in K;i\in V \tag{20}$$

式(2)表示最终任务完成时间不小于任意任务的完成时间；式(3)和(4)表示每台 AGV 必须完成虚拟开始和虚拟结束任务；式(5)和(6)表示每个任务仅有一个紧前和后继任务；式(7)表示中间任务必须运输平衡，即输入等于输出；式(8)表示 AGV 执行任务时的空驶距离；式(9)表示普通任务和换电任务等待时间的计算；式(10)表示普通任务和换电任务完成时间的计算；式(11)表示搬运任务开始时 AGV 的剩余电量更新；式(12)表示换电任务开始时，AGV 剩余电量不大于换电阈值；式(13)表示 AGV 普通任务和换电任务完成时的剩余电量更新，换电任务完成时电量为 100%；式(14)表示 AGV 只能执行属于自己的 n 个虚拟换电任务；式(15)为一台 AGV 的换电次数之和，不允许超过最多换电次数 s；式(16)表示一台 AGV 若换电 i 次，只能完成前 i 个换电任务；式(17)和(18)为不同剩余电量区间下，AGV 空重载的速度差异；式(19)和(20)为变量的约束。

2.2　下层电池包配置模型

2.2.1 模型假设

a)不考虑换电工位维护等因素；

b)每个换电站遵循先到先服务的原则；

c)电池仓内电池初始电量均为 100%；

d)每个换电工位同一时刻仅为 1 台 AGV 更换电池包；

e)不考虑电池包使用寿命和成本的影响；

2.2.2 符号说明

本文下层模型使用的符号如表 2 所示。

2.2.3 模型建立

式(21)为目标函数，表示最小化 AGV 总换电时间；

$$Min\quad F' \tag{21}$$

s.t.

$$F'=\sum_{k\in K}\sum_{u\in U}(Ft_{uk}-St_{uk}) \tag{22}$$

$$\sum_{t\in T}p_{ukt}=1,\forall k\in K;u\in U_k \tag{23}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{t\in T}\sum_{u\in U}q_{tuzk}=1,\forall z\in Z \tag{24}$$

$$Ft_{uk}=(L_{ukt}+DD_{ukt}/s_2)\cdot p_{ukt},\forall u\in U_k,k\in K,t\in T \tag{25}$$

$$At_{ukt}=St_{uk}+p_{ukt}\cdot DD_{ukt}/s_2,\forall u\in U_k,t\in T,k\in K \tag{26}$$

$$ll_{tuzk}=\begin{cases}q_{tuzk}\cdot ldcc_{tuz},ifl_{tuzk}\geq EC\\ q_{tuzk}\cdot EC,ifl_{tuzk}<EC\end{cases},\forall u\in U_k,t\in T,k\in K,z\in Z \tag{27}$$

$$lldcc_{tuz}=q_{tuzk}l_{tuzk},\forall u\in U_k,t\in T,k\in K,z\in Z \tag{28}$$

$$ldcc_{tuz}=\max\{100\%,(Ct_{u'ktz}-Lt_{uktz})\cdot ve\},\forall u\in U_k,t\in T,k\in K,z\in Z \tag{29}$$

$$WW_{uktz}\leq\begin{cases}\max(0,Lt_{u'k't}-At_{ukt}),\text{if } l_{tuzk}\geq EC\\ \max(0,Lt_{u'k't}-At_{ukt})+q_{tuzk}\cdot(EC\text{-}l_{tuzk})/ve,\text{if } l_{tuzk}<EC\end{cases} \tag{30}$$

$\forall t\in T,k,k'\in K,u\in U_{k'},u'\in U_{k'},z\in Z;$

$$N+n\leq M \tag{31}$$

$$Ct_{uktz}=p_{ukt}\cdot q_{tuzk}(A_{ukt}+W_{uktz});\forall u\in U_k;t\in T;k\in K,z\in Z \tag{32}$$

$$Lt_{uktz}=Ct_{uktz}+a_{fix},\forall u\in U_k,t\in T,k\in K,z\in Z \tag{33}$$

$$p_{ukt}\in\{0,1\},\forall t\in T,k\in K,u\in U_{k,} \tag{34}$$

$$q_{tuzk}\in\{0,1\};\forall t\in T,k,\in K,u\in U_K,z\in Z \tag{35}$$

式(22)表示 AGV 换电总时间的计算；式(23)表示一台 AGV 一次换电只能选择一个换电站；式(24)表示每一块电池包每次换电任务只能服务一台 AGV；式(25)表示换电完成后

到达后继任务起点位置的时刻；式(26)表示到达换电站时刻，即本次换电指令产生时刻与驶向换电站空驶时间之和；式(27)表示换电后 AGV 电池包电量更新，即所选电池电量需大于最低允许换电电量 EC；式(28)表示每次换电任务结束后，电池仓内本次被用过的电池包电量的更新，更新为从 AGV 上换下来的电量不足的电池包电量；式(29)表示每次换电任务开始时，电池仓内电池包的电量更新，即本次换电开始时间和上一次换电结束时间之差与充电机组充电速率的乘积；式(30)表示换电站等待时长的计算，若到达换电站时前一台 AGV 尚未完成换电则排队等待，若所选换电电池包电量低于最低换电电量时，则充电等待；式(31)表示大小换电站的电池初始总数量不得多于换电总次数；式(32)表示换电工位开始操作时刻的计算，即到达换电站时刻与排队时长之和；式(33)表示电池包更换完成时刻，即换电开始时刻加上换电的操作时长；式(34)和(35)为变量的约束。

表 2　下层模型的符号说明

Tab. 2　Symbols for lower level model

符号	含义
K	K={1,2,3,4,.....k}，AGV 集合
V_k	V_k ={1,2,.....n} ,第 k 台 AGV 对应的换电任务集合
V_b	$V_b = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup .... \cup V_k$,全部换电任务集合
T	T={1,2,3.....t}，换电站集合
Z	Z={1，2，…，z}，电池包集合
U_k	换电需求集合，由调度模型可得 u∈U，$U = U_1 \cup U_2 \cup ... \cup U_k$
W_t	换电站换电任务集合
N n	大小换电站的初始电池数量
s1 s2	AGV 空重载状态下的运行速度
MC	执行换电任务的最低电量
EC	允许换电的电池包电量阈值
M	AGV 的总换电次数
a_{fix}	一次更换电池包的操作时间
ve	换电站的电池包充电速率
St_{uk}	第 k 台 AGV 第 u 次换电指令产生时刻
Ft_{uk}	第 k 台 AGV 完成第 u 次换电后，到达换电后继任务发箱位置的时刻
DD_{ukt}	换电站 t 第 u 次换电驶向后继任务起点的距离
At_{ukt}	第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 t 号换电站的到达时刻
Ct_{uktz}	第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 t 号换电站中的 z 号电池包换电开始操作时刻
WW_{uktz}	第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 t 号换电站中的 z 号电池包换电的排队时长
Lt_{uktz}	第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 t 号换电站中的 z 号电池包换电完成时刻
l_{tuzk}	第 k 台 AGV 在 t 换电站进行第 u 次换电开始时的电池电量
$ldcc$	第 k 台 AGV 在 t 换电站进行第 u 次换电结束时的电池电量
$ldcc_{tuz}$	换电站 t 中第 u 次换电开始时 z 号电池包的电量
$lldcc_{tuz}$	换电站 t 中第 u 次换电结束时 z 号电池包的电量
p_{ukt}	决策变量，若第 k 台 AGV 第 u 次换电时选择 t 号电站，则 p_{ukt} =1，否则　为 0
q_{tuzk}	决策变量，若换电站 t 的 z 号电池服务第 k 台 AGV 的第 u 次换电，则 q_{tuzk} =1，否则为 0

3　遗传算法

考虑换电过程和电池包数量的自动化集装箱码头的多 AGV 调度问题，在本质上与多循环的 VRP 问题是相似的，也属于 NP-hard 问题，此类问题的特点就是多循环、高度并发性以及容易陷入局部最优，而遗传算法恰好是一种能够实现高度并发以及全局搜索的全局优化算法，具有很好的收敛性和鲁棒性，并且遗传算法还有灵活的编码方式，可以实现实数编码和二进制编码等，简单有效的编码规则，能够使其遗传操作和种群更新的过程中产生更少的非法解，因此，本文采用遗传算法来求解研究的问题，以获得其近似最优解。

3.1　染色体编码

本文的遗传算法编码方式采用的是实数编码，实数编码能够很直观用染色体来表达实际问题，如图 3，为上层 AGV 集装箱任务调度模型的一条染色体编码，可以看出整个染色体分为两段，每段染色体上都有 n 个基因，n 表示集装箱任务的数量，前 n 个基因表示 n 个集装箱任务的序号，后 n 个基因表示执行这 n 个集装箱任务对应的 AGV 序号，即在 2n 个基因中，第 i(i<=n)个基因表示的集装箱任务序号，它是由第 i+n 个基因表示的 AGV 序号进行作业的。

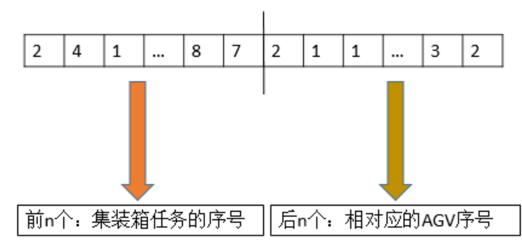


图 3　上层模型染色体编码示意图

Fig. 3　Chromosome coding diagram of upper model

下层 AGV 换电调度模型的染色体编码原理同上层模型，在图 4 中：整个染色体分为前后两段，前段染色体的基因值 1 表示小换电站，2 表示大换电站。前后两段染色体的长度为在上层调度模型中所有 AGV 产生的换电次数，后半段染色体的基因值表示换电站中的电池编号，图 4 染色体中前后段的第一个基因值表示的是：在 AGV 产生的所有换电需求中，第一次执行换电任务去小换电站，且在小换电站中换电机器人选择 2 号电池包进行换电作业。

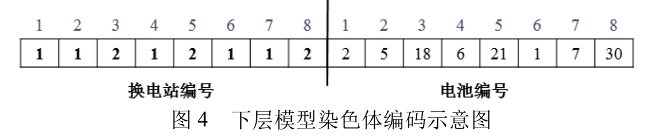


图 4　下层模型染色体编码示意图

Fig. 4　Chromosome coding diagram of lower model

3.2　遗传操作

3.2.1 选择

本文的双层模型中，均采用的是轮盘赌选择算子，具体的选择步骤如下：

a)：计算每个个体的适应度值 Fm；

b)：计算每个个体遗传到下一代的概率 Pm；

c)：计算出每个个体的累计概率 Cm；

d)：产生一个随机数 s∈(0,1]，如果 Cm-1≤s≤Cm ，则第 m 个个体被选择；

e)：重复步骤 4，直到种群数量等于初始种群数量；

3.2.2 交叉与变异

在上层模型中，采用的是两点交叉和两点变异的遗传操作。

交叉过程为：选取两条父代染色体 M1 和 M2，在两条父代染色体上随机选取两个交叉点 r1、r2，将 M1 上两个交叉点之间的染色体片段 p1 与 M2 上两个交叉点之间的染色体片段 p2 进行交叉互换，进而得到两条子代染色体 m1 和 m2。但是，由于染色体前后两段的基因值表示的实际意义的不同，因此在交叉的时候，不能跨段交叉，并且由于一个集装箱只能被一台 AGV 搬运的约束，因此在 p1 与 p2 交叉互换过后，片段中与染色体中重复的基因值需要更新为整条染色体缺少

的基因值，具体的交叉过程示意图，如图 5。

		r1	p1		r2					
M1	2	4	1	9	......	2	1	1	......	2
			p2							
M2	3	5	9	4	......	1	2	2	......	3
m1	2	5	9	4	......	2	1	1	......	2
m2	3	4	1	9	......	1	2	2	......	3

图 5　交叉过程示意图

Fig. 5　Schematic diagram of crossing process

两点变异的具体过程为：在一条父代染色体上的前后两段染色体中，分别随机选取一个变异基因位置 q1、 q2，由于前段染色体表示集装箱任务编号，后段染色体表示相对应的 AGV 编号，且一台 AGV 一次只能搬运一个集装箱，因此分别对在前后段两个变异位置上的基因进行集装箱任务编号变异和 AGV 序号变异，并且从而得到两条子代染色体。具体的变异过程示意图，如图 6。

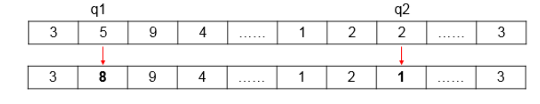


图 6　变异过程示意图

Fig. 6　Schematic diagram of variation process

下层模型的交叉变异的方式和上层模型中的基本相同，由于下层模型的染色体基因个数没有上层模型的规模大，因此为了不破坏染色体的遗传特性，下层模型的交叉和变异采取单点交叉和单点变异的遗传操作。

3.3　适应度函数

本文构建的双层模型的目标函数分别是最小化最大完工时间和最小化总换电时间，通过解码染色体，最后一个集装箱任务被完成的时间即为最大完工时间，换电完成时刻与换电需求产生时刻的差为一台 AGV 的换电总时间，即换电总时间为驶向换电站的时间、等待换电的排队时间、等待电池包充电的时间与驶出换电站到达后继任务始点的时间之和。取二者的倒数，分别作为上下层遗传算法中的适应度函数。

4　算例分析

4.1　参数设置

为了评估本文所建立的双层模型的有效性，利用 Matlab 软件，对以下算例进行求解分析。设计 100 个集装箱，5 台 AGV 的算例，对于每一个集装箱任务的最早开始时间、起始位置和终止位置等属性，如表 3 所示。设置种群规模 NP=50，最大迭代次数 M=100，在双层遗传算法中，上层交叉概率和变异概率分别为 p_c=0.7、p_m=0.01，下层交叉概率和变异概率分别为 P_C=0.5、P_M=0.01。设置 AGV 的换电 SOC 阈值为 30%，当 AGV 的 SOC 在(0,30%]区间，其空载运行速度为 2.5m/s，当 AGV 的 SOC 在[30%,60%]区间，其空载和重载两种状态的速度分别为：3m/s、2.5 m/s，当 SOC 在[60%,100%]区间内，其空重载的速度分别为 4 m/s、3 m/s，空载和重载状态下每米耗电速率分别为：0.01%、0.025%，当 AGV 停车等待时，其每秒耗电速率为 0.005%。且一共有两个换电站，一大一小，分别位于 AGV 行车道的尽头两端，每个换电站设置一个换电工位，且换电站-场桥-岸桥的距离如表 4 所示，场桥和岸桥执行一次任务分别花费 90s 和 120s，每个换电站的换电机器人换电速率为 300s/次，大换电站中电池仓内的初始电池包数量是 30 个，小换电站内有 15 个，换电站内采取的换电策略是边换电，充电机边充电，最低可换电电量 Pv=60%，且参考对电动公交车的研究，设置充电机的充电速率为：每充电一分钟，电池包获得 8min 的续航时间。

表 3　集装箱任务属性表

Tab. 3　Attribute table of container task

任务编号	任务类型	任务起点	任务最早开始时间(s)	任务终点
1	卸船	QC3	118	YC3
2	卸船	QC 1	182	YC3
3	装船	YC 2	244	QC 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
500	装船	YC 4	24420	QC 2

表 4　换电站-场桥-岸桥距离表/m

Tab. 4　Distance between exchange station, yard bridge and shore bridge

	小	QC1	QC2	QC3	YC1	YC2	YC3	YC4	YC5	大
小	0	360	185	225	265	100	140	180	220	260
QC1	360	0	265	225	185	260	220	180	140	100
QC2	185	265	0	40	80	45	85	125	165	205
QC3	225	225	40	0	40	85	125	165	205	245
YC1	265	185	80	40	0	125	165	205	245	285
YC2	100	260	45	85	125	0	40	80	120	160
YC3	140	220	85	125	165	40	0	40	80	120
YC4	180	180	125	165	205	80	40	0	40	80
YC5	220	140	165	205	245	120	80	40	0	40
大	260	100	205	245	285	160	120	80	40	0

4.2　小规模双层模型结果分析

基于上述的参数设置，将此规模的算例和相关参数代入遗传算法进行求解，上层模型的适应度函数收敛过程如图 7 所示，求解结果如表 5 所示。从得到近似最优解中可知，此规模的算例中，上层模型的结果为：最大完工时间为 167min，且期间只进行了 1 次换电，此次换电发生在 3 号 AGV 的作业过程中。继续运行下层模型的代码，得下层模型的结果为：此次换电去的是小换电站，换的是 4 号电池包，换电总时间为 10.4167min。第 3 辆 AGV 的任务作业顺序及时间的甘特图如图 8，可知 3 号 AGV 一共执行了 18 个集装箱任务，执行了 1 个换电任务。

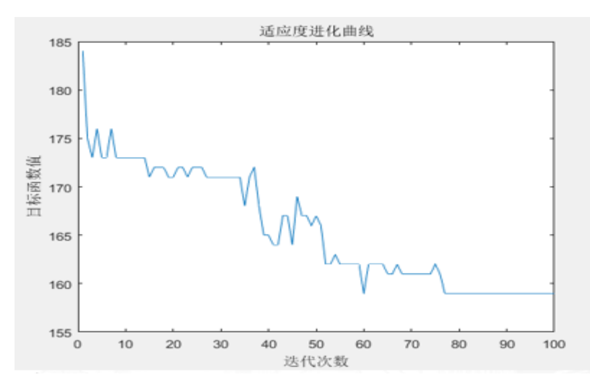


图 7　小规模算例上层模型适应度函数进化曲线图

Fig. 7　Evolution curve of fitness function of upper model under small-scale example

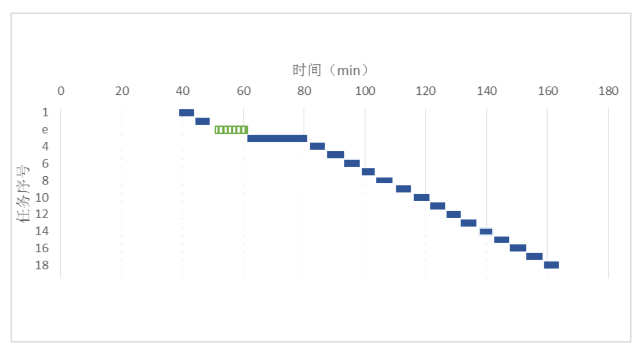


图 8　AGV 作业甘特图

Fig. 8　Gantt chart of AGV operation

表 5　小规模算例运算数值结果表

Tab. 5　Numerical results of small-scale calculation example

换电次数	换电需求产生时间	换电 AGV 序号	换电地点	换电池包	最大完工时间	换电总时间
1	50.87min	3	小换电站	4	167min	10.4167min

4.3　大规模双层模型结果分析

小规模算例验证了双层模型的有效性后，将算例规模扩大至集装箱数量 n=500，AGV 的数量 a=10，对双层模型进行遗传算法求解可知，上层模型输出的结果为：AGV 最大完工时间为 632.6min，10 台 AGV 共进行 13 次换电，且以 3 号 AGV 为例，其作业顺序如表 6 所示，可知其在执行第 77 和 1 号集装箱任务后，产生换电需求。

表 6　3 号 AGV 作业顺序

Tab. 6　Operation sequence of AGV No.3

AGV 序号	作业顺序
3	334→197→472→462→451→232→482→290→171→385→308→77→**换电**→70→216→356→497→318→107→421→227→58→168→21→437→474→274→201→239→341→18→28→1→**换电**→92→426→134→253→473→369→89→209→457→37→244→86

继续运行得出下层模型的运行结果，其中，下层模型的适应度函数进化结果如图 9 所示。下层模型中输出的结果为：AGV 换电总时间为 167.85min，且每台 AGV 的换电次数、换电需求产生时的时间、剩余电量、换电场所、换电电池包编号见表 7。

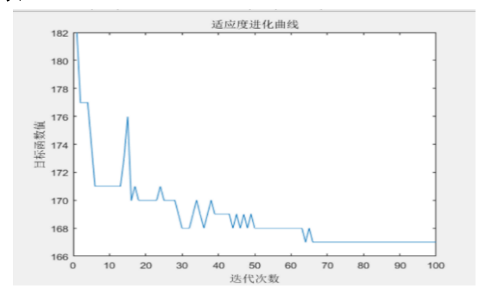


图 9　大规模算例下层模型适应度函数进化曲线图

Fig. 9　Evolution curve of fitness function of lower model of large-scale example

表 7　大规模算例 AGV 换电结果

Tab. 7　AGV power exchange results of large-scale calculation example

AGV 编号	换电次数	换电时刻(min)	剩余电量	换电场所	换电电池包编号
1	2	469.78	34.00%	小	5
		559.51	34.84%	小	4
2	1	455.27	33.79%	小	12
3	2	512.91	33.35%	小	2
		605.2	34.84%	小	1
4	1	508.14	34.30%	小	14
5	1	547.79	35.86%	小	4
6	1	457.21	33.47%	大	41
7	1	479.82	35.13%	大	43
8	1	543.36	34.36%	大	20
9	1	494.88	33.64%	大	22
10	2	429.84	34.06%	小	13
		537.81	33.02%	大	36

在集装箱数量 n=500，AGV 数量 a=10 的规模算例中，一共产生了 13 次换电需求。优化前，13 次换电需求需要 13 个电池包来满足，而决策和约束电池包的选择后，13 次换电任务中，每次换电任务中换电机器人选择的电池包编号以及大小换电站中的所有电池包的使用次数记录如表 8。

表 8　换电站电池包使用次数记录

Tab. 8　Records of battery packs used in power station

电池编号	1	2	3	6	7	20	22	38	38	38
使用次数	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1

在表 8 中：AGV 一共在小换电站进行了 8 次换电，大换电站进行了 5 次换电，其中 1、2、6、20、22、38、41 和 43 号电池包使用了 1 次，7 号电池包使用了 2 次，3 号电池包使用了 3 次。因此，在集装箱数量为 500 个，AGV 数量为 10 台的规模算例中，一共产生了 13 次换电需求，优化后，一共用到了 10 块电池包，相比于优化前需要的 13 块电池包，电池包的数量减少了 23.1%。

在上层模型中，通过考虑 AGV 空重载耗电差异和不同剩余电量区间的空重载速度差异，来提高电池包的利用率，通过输出的数据统计结果，优化前后的换电需求产生时的电池利用率如图 10。可知优化前产生 14 次换电，优化后产生 13 次换电，总换电次数减少 1 次，优化后的电池平均利用率为 61.34%，优化后的电池平均利用率为 67.80%，电池平均利用率提升 6.46%。

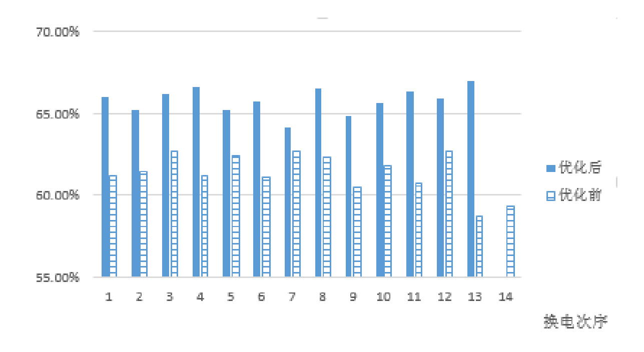


图 10　换电需求产生时的电池利用率

Fig. 10　Battery utilization when power exchange demand is generated

4.4　交叉率灵敏度分析

当算例规模变大，会影响染色体的长度，在染色体进行交叉算子操作的时候，交叉率的大小会对代码运行结果产生不同程度的影响，如图 11 所示，在不同的上层模型交叉率 p_c 下，上层模型的代码结果即 AGV 最大完工时间会产生相应的变化，可知，当上层模型交叉率 p_c=0.6 时，结果最为理想。

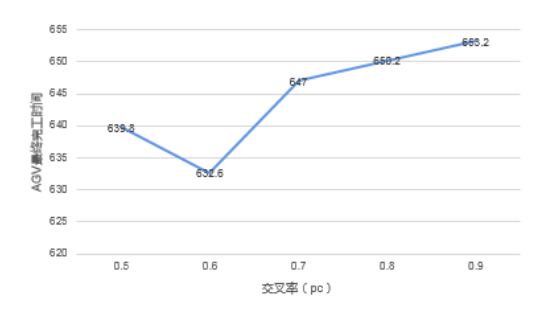


图 11　不同 pc 下的 AGV 最大完工时间

Fig. 11　Maximum completion time of AGV under different pc

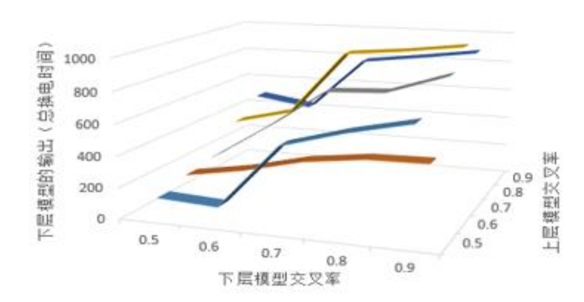


图 12　不同 pc 和 PC 下的 AGV 总换电时间

Fig. 12　Total power change time of AGV under different pc and PC

在图 12 中：设置不同的上下层交叉率 p_c 和 P_C，得到下层模型的代码运行结果即 AGV 总换电时间，可知当 p_c=0.6，P_C=0.5 时，下层模型的结果最为理想，因此，在代码运行的参数设置中，将上层模型交叉率 p_c 设置为 0.6，下层模型交叉率 P_C 设置为 0.5。

4.5　不同剩余电量的 AGV 速度灵敏度分析

在 AGV 进行装卸搬运的过程中，结合实际码头运作情况，AGV 在不同的剩余电量状态下，其空载重载时的运行速度也是不同的。根据已有研究可知，AGV 根据荷电状态(SOC)分为三个区间，分别是强制充电区间(0,30%]，即只进行换电任务，只有空载速度。机会充电区间[30%,60%]，即可执行换电任务也可执行集装箱任务，正常工作区间[60%,100%]，即只进行集装箱搬运任务，且此区间的空重载的运行速度大于机会充电区间。V0 和 V1 分别为空、重载速度，由于空重载的速度随着剩余电量的减少而降低，并且空重载速度的大小会影响最终完工时间，并且不能设置太高的速度，设置过高，则会导致电量消耗较快，增加换电次数，这与优化最终完工时间背道而驰。因此本文设置五种方案如表 9，来对各剩余电量区间的空重载速度进行灵敏度分析，能够有效提高电池包的利用率。

表 9　五种不同剩余电量的 AGV 速度方案

Tab. 9　Five AGV speed schemes with different residual power

方案序号	强制充电区间	机会充电区间		正常工作区间	
	V0(m/s)	V0(m/s)	V1(m/s)	V0(m/s)	V1(m/s)
1	2.4	2.9	2.4	3.9	2.9
2	2.5	3	2.5	4	3
3	2.6	3.1	2.6	4.1	3.1
4	2.7	3.2	2.7	4.2	3.2
5	2.8	3.3	2.8	4.3	3.3

对每种方案进行 10 次代码运行，取平均值，最后得出五种方案下的 AGV 最大完工时间如图 13 所示，从曲线图中可知，方案二的运行结果在五种方案中最优，因此，对 AGV 根据自身不同的 SOC 的速度参数设置时，设置 SOC 在[0,30%]时，空载速度为 2.5m/s，SOC 在[30%,60%]时，空载和重载速度分别为 3m/s、2.5m/s，当 SOC 在[60%，100%]时，空载和重载的速度分别为 4m/s、3m/s。

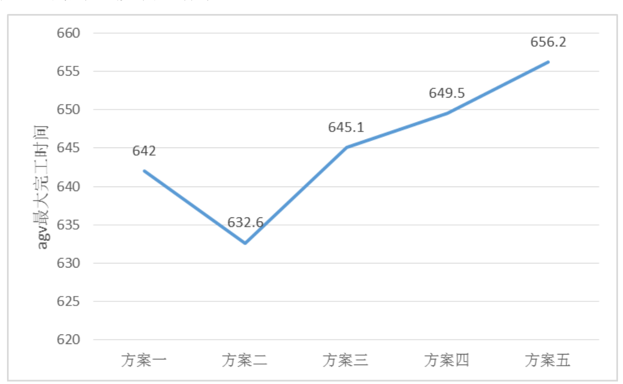


图 13　不同方案的 AGV 最大完工时间

Fig. 13　AGV maximum completion time of different schemes

5　结束语

自动化集装箱码头的工作效率，在很大程度上受到 AGV 的影响，本文在前人研究的基础上，本文针对 AGV 装卸搬运作业过程中，考虑 AGV 的电池续航时长、空重载 SOC 的变化特性以及不同剩余电量的空重载运行速度差异，对 AGV 在换电站进行电池包更换的过程中，考虑 AGV 产生的换电需求以及换电站内电池包的选取原则和流程，对每一次换电需求对应的换电站和换电电池包的选择进行决策，建立 AGV 的集装箱任务调度模型和换电电池包配置模型，采用 GA 来对模型进行编码求解，以 500 个集装箱 10 台 AGV 为例，进行求解，结果表明，该双层模型能够有效地减少总任务完成时间和换电总时间，提升了 6.46%的 AGV 电池包利用率，并且能够合理有效地规划换电站的电池包储备数量，降低了 23.1%的电池包储备数量。由此可见，该双层模型的研究对提高自动化集装箱码头的运作效率有一定的现实意义，为进行自动化码头换电站内电池包数量的研究提供一种思路。

参考文献：

[1] Kim KH, Bae JW. A Look-ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals [J]. Transportation Science, 2004, 38 (2) .

[2] Frank S, Ulrich W. Optimization of Battery Charging and Purchasing at Electric Vehicle Battery Swap Stations [J]. Transportation Science, 2018, 52 (5):

[3] Xiang Xi, Liu Changchun. Modeling and analysis for an automated container terminal considering battery management [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156:

[4] 石楠路，梁承姬. 考虑换电过程的自动化码头 AGV 调度优化 [J]. 现代制造工程，2019 (02): 6-11+139. (Shi Nanlu, Liang Chengji. Scheduling optimization of automated terminal AGV considering power exchange process [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019 (02): 6-11+139.)

[5] 周小凡，苌道方，余芳，等. 考虑充电和等待时间的集装箱码头 AGV 调度 [J]. 上海海事大学学报，2019, 40 (03): 1-5+13. (Zhou Xiaofan, Chang Daofang, Yu Fang, *et al.* AGV scheduling in container terminals considering charging and waiting time [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40 (03): 1-5+13.)

[6] 张亚琦，杨斌，胡志华，等. 自动化码头 AGV 充电与作业的集成调度研究 [J]. 计算机工程与应用，2017, 53 (18): 257-262+270. (Zhang Yaqi, Yang Bin, Hu Zhihua, *et al.* Research on integrated scheduling of AGV charging and operation in automated terminals [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53 (18): 257-262+270.)

[7] 吴洪明，邹梦艳. 考虑电池电量约束的自动化码头 AGV 调度 [J]. 起重运输机械，2021 (03): 47-52. (Wu Hongming, Zou Mengyan. Automatic terminal AGV scheduling considering battery power constraints [J]. Hoisting and Transportation Machinery, 2021 (03): 47-52.)

[8] 丁一，陈婷. 基于滚动时域优化策略的多载 AGV 充电调度 [J]. 中国航海，2020, 43 (02): 80-85. (Ding Yi, Chen Ting. Multi-load AGV charging scheduling based on rolling time domain optimization strategy [J]. China Navigation, 2020, 43 (02): 80-85.)

[9] 郑亚红，徐玖龙，谢淳. 自动化集装箱码头 AGV 换电管理与调度优化 [J]. 武汉理工大学学报（交通科学与工程版）, 2021, 45 (01): 1-6. (Zheng Yahong, Xu Jiulong, Xie Chun. AGV power exchange management and scheduling optimization in automated container terminals [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition) , 2021, 45 (01): 1-6.)

[10] 傅正堂，胡志华，宗康. 集装箱码头 AGV 电量非饱和状态下的调度优化 [J]. 大连海事大学学报, 2017, 43 (03): 58-62. (Fu Zhengtang, Hu Zhihua, Zong Kang. Scheduling Optimization of AGV in Container Terminal under Non-saturated State of Electricity [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43 (03): 58-62.)

[11] 范厚明，郭振峰，岳丽君，等. 考虑能耗节约的集装箱码头双小车岸桥与 AGV 联合配置及调度优化 [J]. 自动化学报，2021, 47 (10): 2412-2426. DOI: 10. 16383/j. aas. c190626. (Fan Houming, Guo Zhenfeng, Yue Lijun, *et al.* Combined configuration and scheduling

optimization of dual-trolley quay cranes and AGVs in container terminals considering energy saving [J]. Chinese Journal of Automation, 2021, 47 (10): 2412-2426. DOI: 10. 16383/j. aas. c190626.)

[12] 宋绍京, 羊铭雨, 孙磊, 等. AGV 数量规划及电池充电策略研究 [J]. 长春理工大学学报（自然科学版）, 2019, 42 (06): 73-77. (Song Shaojing, Yang Mingyu, Sun Lei, *et al.* Research on AGV Quantity Planning and Battery Charging Strategy [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition) , 2019, 42 (06): 73-77.)

[13] 黄宇超. 自动化码头 AGV 换电站布局设计 [J]. 港口装卸, 2021 (04): 61-65. (Huang Yuchao. Layout Design of AGV Swap Station in Automated Wharf [J]. Port Handling, 2021 (04): 61-65.)

[14] 樊陆彬, 梁承姬, 佘文婧. 不确定环境下的岸桥-集卡协调调度耦合模型建立与求解 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (03): 843-848. (Fan Lubin, Liang Chengji, She Wenjing. Establishment and solution of the coupled model of quay crane-truck coordination dispatch in uncertain environment [J]. Computer Applications, 2016, 36 (03): 843-848.)

[15] 陈香玲, 郭鹏, 温昆, 等. 考虑充电需求和时间窗的多 AGV 调度优化建模 [J]. 河北科技大学学报, 2021, 42 (02): 91-100. (Chen Xiangling, Guo Peng, Wen Kun, *et al.* Multi-AGV scheduling optimization modeling considering charging demand and time window [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42 (02): 91-100.)